

·学术论文与技术报告·

# 空间光通信 ATP 系统设计分析\*

熊金涛\*\*

张秉华

(电子科技大学应用物理所 成都 610054) (中国科学院光电研究所 成都 610041)

**【摘要】** 空间光束捕获、跟踪、瞄准(ATP)技术在空间光通信中具有重要地位。文中讨论了空间光通信系统中的 ATP 伺服系统的结构,并对系统稳态设计和系统动态综合等关键问题进行了详细的分析和研究。

**关键词** 空间光通信; 捕获、跟踪、瞄准技术; 系统稳态设计; 系统动态综合  
中图分类号 TN929.1; TN202.1

卫星、飞机和舰船都是运动载体,它们之间的激光通信是在运动中进行的,它们的运动轨迹具有很大的灵活性和突变性;且在卫星等远距离通信中,要求有高达微弧度量级的对准精度,所以为了保证在运动过程中通信的连续可靠性,必须运用空间光束的自动捕获、跟踪、瞄准(Acquisition, Tracking and Pointing—ATP)技术。我们对 ATP 技术进行了研究,取得了很多成果。本文对该方面的研究进行讨论。

## 1 空间光通信系统的基本结构和组成

在本项研究中的空间光通信系统包括有收发合一的光学天线、信号探测与处理、ATP 伺服控制、机械转动机构与光学平台等几个大的部分。其系统总体框图如图 1 所示。

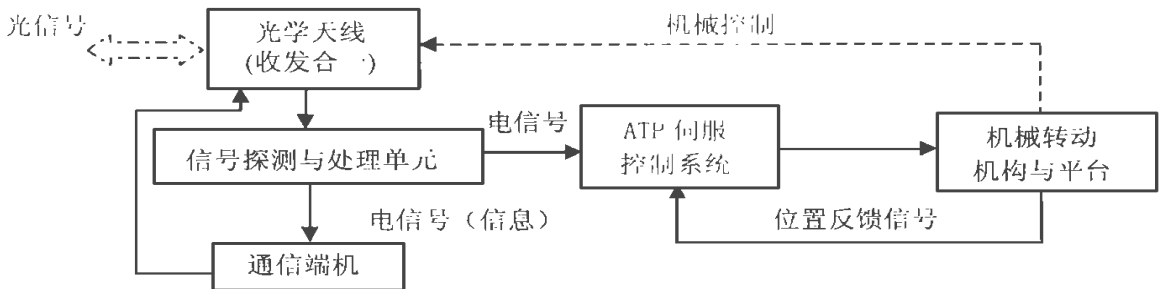


图 1 空间光通信系统基本结构和组成

## 2 ATP 伺服控制系统的组成结构与工作流程

在 ATP 伺服控制系统中包括有信号模/数转换与处理、控制计算机与接口、信号数/模转换与处理、控制校正网络、伺服驱动单元、反馈控制机构和伺服电机组等部分组成,具体结构如图 2 所示。

整个 ATP 伺服控制系统的工作过程如下:

1) 模/数转换与处理单元将由四象限光电探测器传送来的四象限模拟电信号经放大、整形和 A/D 变换等处理,经由数据分配接口送入主控制计算机。

2) 主控制计算机在专门设计的控制处理程序的运行下,完成对四路数字信号的分象限水平和垂直方向的和差、对比运算,并根据运算结果确定水平和垂直方向的天线定位偏差。根据偏

1998 年 6 月 28 日收稿

\*国防科研基金资助项目

\*\*男 31 岁 在职博士生 讲师

差情况, 结合控制校正和伺服驱动等后续单元的特性, 给出相应的速度控制信号和加速度控制信号。

3) 由主控计算机给出的速度控制信号和加速度控制信号又经数据分配接口送入数/模转换与处理网络, 经过 D/A 变换和放大等处理, 将相应的模拟控制信号送入控制校正网络。

4) 控制校正网络根据系统总体指标的要求, 对控制进行校正补偿, 使其保证在满足精度指标的前提下, 同时提供良好的稳定性和过渡过程品质 (如响应时间、最大超调、振荡次数和带宽等性能参数)。

5) 经控制校正网络处理后的信号用以控制伺服驱动系统中的驱动电路和驱动源, 使伺服电机按控制要求转动并进一步带动天线转动机构分别在水平和俯仰两个方位转动以调整天线的位置, 达到自动捕获、跟踪、对准的目的。

6) 以与天线转动机构相连接的光电数字编码器为核心的控制反馈机构同时把天线转动量的信息反馈至主控计算机, 并经处理用以帮助控制信号的形成和天线转动情况的数字显示。

由于大气等传输媒介的影响, 光束的传输路径始终处于偏差变化中, 因此光学接收天线也需不间断地调整以完成 ATP 功能。所以上述的工作过程是连续不断的, 在不断的控制调整中达到一种动态的稳定, 保证通信的连续和畅通。

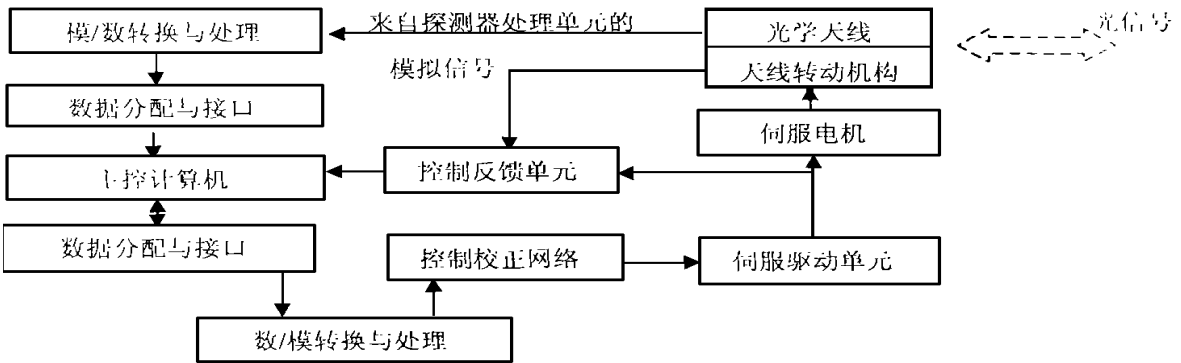


图 2 ATP 伺服控制系统的组成结构

### 3 系统的技术指标与关键技术

根据空间光通信系统的整体要求和实际组件的性能, ATP 伺服控制系统的主要技术指标要求有: 1) 系统搜索范围:  $\pm 1^\circ$ ; 2) 光束对准精度:  $50 \mu\text{rad}$ ; 3) 搜索对准时间: 10 min; 4) 系统频率响应 (带宽): 5 Hz; 5) 信标光束散角: 5 mrad; 6) 信号光束散角: 0.5 mrad; 7) 天线安装初始误差:  $< \pm 0.5^\circ$ 。

为了保证系统的技术指标, 有几部分关键技术和单元器件的设计与选择是极为重要的。下面我们对 ATP 系统设计中的难点和主要问题分别进行讨论。

#### 3.1 系统稳态设计—直流力矩电机和测速机的选择

在高精度的伺服系统中采用直流力矩电机作为执行元件与采用普通伺服电机相比有许多优点。直流力矩电机机械刚度好、机械谐振频率高、可和负载直接耦合。因此采用直流力矩电机构成跟踪伺服系统容易实现高精度、宽频带的平稳运行, 且低速性能特别好。

在本项研究中对电机的选择采用以下的理论计算和方法。首先计算电机轴上承受的总负载力矩  $M_\Sigma$

$$M_\Sigma = M_C(\text{阻力矩}) + M_F(\text{静摩擦力矩}) + J_\Sigma \ddot{\theta}_{L \max}(\text{加速力矩}) \quad (1)$$

式中  $J_\Sigma = J_L(\text{负载转动惯量}) + J_M(\text{电机电枢转动惯量}) + J_{TC}(\text{测速电机电枢转动惯量})$

其中  $\ddot{\theta}_{L \max}$  为负载最大加速度 ( $\mu\text{rad}/\text{sec}^2$ )。

根据经验测试数据和模型计算, 在本项研究中, 我们选取 J160LYX06G 力矩电机和 160YDN01W 测速机作为方位方向的执行部件。它们的峰值力矩转动惯量分别为

$$M_P = 2.8 \text{ kg} \cdot \text{m}, J_M = 0.0021 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2, J_{TG} = 0.0021 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2, J_L = 0.181 \text{ kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$$

所以其方位方向总的转动惯量为

$$J_{A\Sigma} = 0.181 + 0.0021 + 0.0021 = 0.1852 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 \quad (2)$$

俯仰方向我们选用 J130LYX04A 力矩电机和 130CYDN02A 测速机, 它们的具体技术指标为

$$M_P = 1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}, J_M = 0.1 \text{ kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2, J_{TG} = 0.1 \text{ kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2, J_L = 1.58 \text{ kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$$

由此可计算出俯仰方向总的转动惯量为

$$J_{E\Sigma} = 1.58 + 0.1 + 0.1 = 1.78 \text{ kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2 = 0.0178 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 \quad (3)$$

静摩擦力矩  $M_F$  方位和俯仰方向估值为  $0.05 \sim 0.10 \text{ kg} \cdot \text{m}$ , 阻力矩  $M_C$  可忽略不计。如果负载最大加速度取  $1 \text{ rad}/\text{s}^2$ , 则方位和俯仰方向总的负载力矩分别为

方位方向

$$M_{AL} = M_F + J_{A\Sigma}\ddot{\theta}_{L\max} = 0.1 + 0.185 \times 1 = 0.285 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

取 3 倍余度, 则有

$$M_{AL} = 0.855 \text{ kg} \cdot \text{m} < M_P = 2.8 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

又俯仰方向

$$M_{EL} = M_F + J_{E\Sigma}\ddot{\theta}_{L\max} = 0.1 + 0.0178 \times 1 = 0.1189 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

取 3 倍余度, 则有

$$M_{EL} = 0.3534 \text{ kg} \cdot \text{m} < M_P = 1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

通过上面的计算分析可见, 本项研究中对力矩电机和测速电机的选择是合适的。

### 3.2 系统的动态综合—校正补偿网络设计

系统动态综合的目的在于根据对系统静态精度和动态跟踪精度指标的要求, 在选择系统开环增益条件下对系统的校正补偿装置进行设计, 使其保证在满足精度指标要求的前提下同时提供良好的稳定性和过渡过程品质 (如响应时间、最大超调、振荡次数和带宽性能等)。在本项研究的实验中, 系统可等效为速度回路和位置回路两部分, 因此对系统的动态综合也分为两步进行。

#### 3.2.1 速度回路的动态综合

速度回路的等效方框图如图 3 所示。对于方位速度回路, 系统未加前向校正补偿器  $K_a G_a(S)$  ( $S$ ) 时的开环频率特性为

$$\text{at} \quad \frac{U_{TG}(j\omega)}{\Delta U_{\Omega}(j\omega)} = \frac{K_{TG} K_m}{(1 + j\omega) \left[ 1 + \frac{1}{400} j\omega \right]} \quad (4)$$

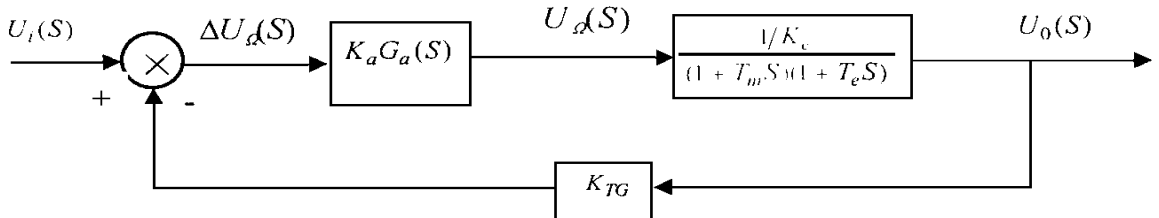


图 3 速度回路方框图

加上前向校正补偿器  $K_a G_a(j\omega) = 555(1 + 0.1j\omega) \setminus (1 + j\omega)$  后的开环频率特性为

$$\frac{U_{TG}}{U_{\Omega}}(j\omega) = \frac{630 \times (1 + 0.1/j\omega)}{(1 + (j\omega)^2) \left[ 1 + \frac{1}{400}j\omega \right]^2} \quad (5)$$

对于俯仰速度回路，系统未加前向校正补偿器  $K_a G_a(j\omega)$  时的开环频率特性为

$$\frac{U_{TG}}{\Delta U_{\Omega}}(j\omega) = \frac{K_m K_{TG}}{(1 + 0.52j\omega)(1 + 0.0023j\omega)} = \frac{K_{TG} K_m}{(1 + \frac{1}{1.92}j\omega) \left[ 1 + \frac{1}{434}j\omega \right]} \quad (6)$$

则加前向校正补偿器  $K_a G_a(j\omega) = 400 \left[ 1 + (j\omega/20) \right] / \left[ 1 + (j\omega/20) \right]$  后的开环频率特性为

$$\frac{U_{TG}}{\Delta U_{\Omega}}(j\omega) = K_a K_a(j\omega) K_m G_m(j\omega) = \frac{400 \left[ 1 + \frac{1}{20}(j\omega) \right]}{P \left[ 1 + \frac{1}{2}j\omega \right]^2 \left[ 1 + \frac{1}{400}j\omega \right]} \quad (7)$$

在上面理论分析的基础上，用 MATLAB 软件对系统的校正补偿进行了计算机仿真，分别得到了方位速度回路和俯仰速度回路在校正补偿前后的对应开环对数频率特性曲线如图 4 所示。

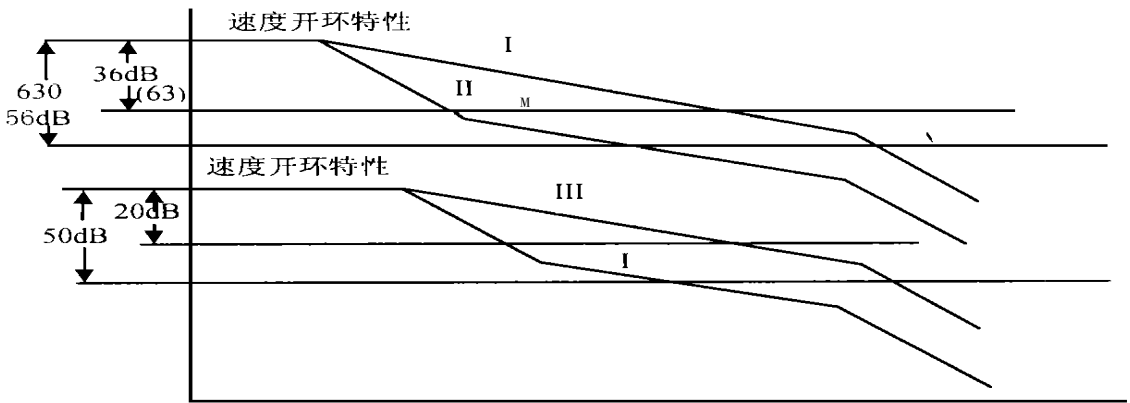


图 4 校正补偿前后的对应开环对数频率特性曲线

从特性曲线上看到，校正补偿后系统的稳态值和带宽特性得到了很好的改善。

### 3.2.2 位置回路的补偿设计

位置回路方框图如图 5 所示。

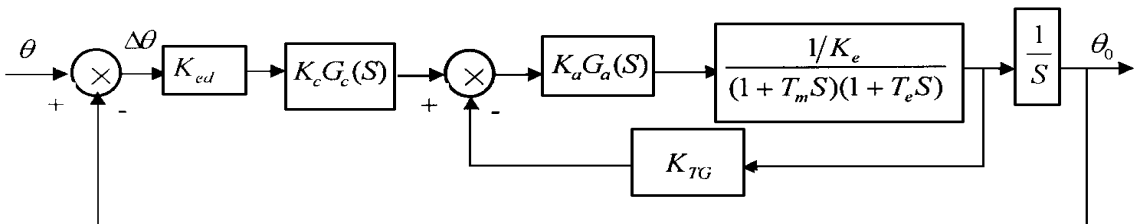


图 5 位置回路方框图

由速度回路补偿设计得知，方位速度回路的闭环频率特性为

$$\frac{\Omega_0}{U_t}(j\omega) = \frac{5\ 040(j\omega + 10)}{(j\omega + 11.79)(j\omega + 66)(j\omega + 324)} = \left[ 1 + \frac{1}{66}j\omega \right] \left[ 1 + \frac{1}{324}j\omega \right] \quad (8)$$

经校正补偿器  $K_c G_c(j\omega) = K\Omega \left[ 1 + \frac{1}{4}j\omega \right] \left[ 1 + \frac{1}{66}j\omega \right] \left( 1 + j\omega \right) \left[ 1 + \frac{1}{324}j\omega \right]$  校正后的方位位置回路的开环频率特性为

$$\frac{\theta_0}{\Delta_0(j\omega)} = \frac{K\Omega \left[ 1 + \frac{1}{4}j\omega \right]}{j\omega(1+j\omega) \left[ 1 + \frac{1}{324}j\omega \right]^2}$$

俯仰速度回路的闭环频率特性为

$$\frac{\Omega_0}{U_1}(j\omega) = \frac{6\ 400(S + 20)}{(j\omega + 27)(j\omega + 78)(j\omega + 300)} \approx \left[ 1 + \frac{1}{78}j\omega \right] \left[ 1 + \frac{1}{300}j\omega \right] \quad (9)$$

加上前向补偿器  $K_c G_c(j\omega) = 0.125 \left[ 1 + \frac{1}{4.4}j\omega \right] \left[ 1 + \frac{1}{78}j\omega \right] \left( 1 + j\omega \right) \left[ 1 + \frac{1}{300}j\omega \right]$  后的俯仰位置回路的开环频率特性为

$$\frac{\theta_0}{\Delta\theta}(j\omega) = \frac{125 \left[ 1 + \frac{1}{4.4}j\omega \right]}{j\omega(1 + \text{位置速度}) \left[ 1 + \frac{1}{300}j\omega \right]^2} = \frac{2\ 556\ 818(j\omega + 4.4)}{j\omega(1+j\omega)(j\omega + 300)^2} \quad (10)$$

由上面的计算分析可看出, 校正补偿后系统的性能得到了有效提高。

## 4 结束语

该论文对空间光通信系统中的 ATP 伺服系统的设计分析已在硬件系统的设计加工中得到应用。系统的初步测试表明, 论文中的设计分析是正确和具有良好的指导意义的。

### 参 考 文 献

- 1 顾瑞龙. 工程控制理论. 北京: 北京科学技术出版社, 1990
- 2 周凤歧. 现代控制理论及其应用. 成都: 电子科技大学出版社, 1994
- 3 毛英泰. 误差理论与精度分析. 长沙: 国防工业出版社, 1982
- 4 李连升. 雷达伺服系统. 长沙: 国防工业出版社, 1993
- 5 解学书. 最优控制理论与应用. 北京: 清华大学出版社, 1986

# Analysis and Design of ATP System in Space Laser Communication

Xiong Jintao

(Institute of Applied Physics, UEST of China, Chengdu 610054)

Zhang Binghua

(Institute of Optics Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610054)

**Abstract** ATP (Acquisition, Tracking and Pointing) technology plays a key role in space laser communication. The structure of ATP system of space laser communication is discussed in this paper, and some important techniques such as system stabilization and system dynamic synthesis are analyzed in details.

**Key words** space laser communication; acquisition tracking and pointing; system stabilization design; system dynamic synthesis